Progetto "Data Center ML10x nel Comune di Settimo Milanese (già ML10 e ML11)" – Studio di impatto ambientale

Allegato 22 – Studio vibrazionale

PREPARATA PER

Equinix Hyperscale 2 (ML10) S.r.l.

DATA
Settembre 2026

REFERIMENTO
0764977

INFORMAZIONI DOCUMENTO

TITOLO	**Progetto "Data Center ML10x nel Comune di Settimo Milanese (già ML10 e ML11)" – Studio di impatto ambientale**
SOTTOTITOLO	Allegato 22 – Studio vibrazionale
NUMERO DI PROGETTO	0764977
Data	Settembre 2026
Versione	Final
Autore	ERM
Cliente	Equinix Hyperscale 2 (ML10) S.r.l.

CRONOLOGIA REVISIONI

				APPROVAZIONE ERM		
VERSIONE	REVISIONE	AUTORE	RIVISTO DA	NOME	DATA	COMMENTI
Final	000	Agon Engineering S.r.l.	Jacopo Signorini	Marco Miori	Settembre 2026	

PAGINA DELLE FIRME

Progetto "Data Center ML10x nel Comune di Settimo Milanese (già ML10 e ML11)" – Studio di impatto ambientale

Allegato 22 – Studio vibrazionale

0764977

Marco Miori
Partner

Chiara Samale
Project Manager

Jacopo Signorini
Project Director

Agon – Vittorio Maria Randazzo
Tecnico specialista

Firmato digitalmente da:
VITTORIO MARIA RANDAZZO
Firmato il 11/09/2026 16:41
Seriale Certificato: 5396999578864607982
Valido dal 03/01/2025 al 03/01/2028
UANATACA Qualified eIDAS CA 2020

ERM Italia S.p.A.
Via San Gregorio, 38
20124 Milano - Italia
Tel: +39 02 674401

© Copyright 2026 by The ERM International Group Limited and/or its affiliates ('ERM'). All Rights Reserved.
No part of this work may be reproduced or transmitted in any form or by any means, without prior written permission of ERM.

INDICE

1.	PREMESSA	1
2.	CENNI TEORICI SULLE VIBRAZIONI	2
3.	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	9
3.1	NORMA UNI ISO 2631-2:2018	9
3.2	NORMA UNI 9614:2017	11
	3.2.1 Limiti di accelerazione massima ponderata (norma UNI 9614)	12
3.3	NORMA UNI 9916:2014	12
	3.3.1 Limiti velocità di vibrazione (norma UNI 9916)	13
3.4	ALTRE NORME	15
4.	INQUADRAMENTO GENERALE	16
5.	INDIVIDUAZIONE DEI RECETTORI	22
6.	VALUTAZIONE DELL'ENTITÀ DELLE VIBRAZIONI AI RECETTORI	24
6.1	STIMA PREVISIONALE DELLE VIBRAZIONI IN FASE DI CANTIERE	25
6.2	STIMA PREVISIONALE DELLE VIBRAZIONI IN FASE DI ESERCIZIO	28
7.	PIANO DI MONITORAGGIO VIBRAZIONALE	34
7.1	PIANO DI MONITORAGGIO VIBRAZIONALE (PMV) ANTE-OPERAM	34
7.2	PIANO DI MONITORAGGIO VIBRAZIONALE (PMV) IN CORSO D'OPERA	35
7.3	PIANO DI MONITORAGGIO VIBRAZIONALE (PMV) IN FASE DI ESERCIZIO	36
8.	MISURE MITIGATORIE	37
9.	CONCLUSIONI	39

ELENCO DELLE TABELLE NEL TESTO

TABELLA 1 - VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DELLE ONDE LONGITUDINALI E FATTORE DI PERDITA PER LE DIFFERENTI TIPOLOGIE DI SUBSTRATO LITOLOGICO	8
TABELLA 2 - VALORI E LIVELLI LIMITE DELLE ACCELERAZIOI COMPLESSIVE PONDERATE	10
TABELLA 3 - LIMITI DI RIFERIMENTO DELLA MASSIMA ACCELERAZIONE PONDERATA DELLA SORGENTE	12
TABELLA 4 - VALORI DI RIFERIMENTO PER LA VELOCITÀ DI VIBRAZIONE (P.C.P.V.) AL FINE DI VALUTARE L'AZIONE DELLE VIBRAZIONI DI BREVE DURATA SULLE COSTRUZIONI	14
TABELLA 5 - VALORI DI RIFERIMENTO PER LE COMPONENTI ORIZZONTALI DELLA VELOCITÀ DI VIBRAZIONE (P.C.P.V.) AL FINE DI VALUTARE L'AZIONE DELLE VIBRAZIONI DURATURE SULLE COSTRUZIONI	14

TABELLA 6 - LIMITI DI RIFERIMENTO PER LA MASSIMA ACCELERAZIONE PONDERATA DELLA SORGENTE DEFINITI DALLA NORMA UNI 9614:2017 24
TABELLA 7 - ATTIVITÀ DI CANTIERE E RELATIVI MACCHINARI 25
TABELLA 8 - LIVELLI DI EMISSIONE VIBRATORIA AMBIENTALE GENERATI DA ALCUNI MACCHINARI DI CANTIERE (A 10 M. DALLA SORGENTE) - (FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION'S MANUAL FOR TRANSIT NOISE AND VIBRATION IMPACT ASSESSMENT AND FEDERAL RAILROAD) 26
TABELLA 9 - LIMITI DI RIFERIMENTO MASSIMI PER LA MASSIMA ACCELERAZIONE PONDERATA DELLA SORGENTE DEFINITI DALLA NORMA UNI 9614:2017 27
TABELLA 10 - FATTORI DI PERDITA PER TIPOLOGIA DI SUBSTRATO 27
TABELLA 11 - SCHEDA TECNICA GENERATORE ELETTRICO CUMMINS C3750 D5 29

ELENCO DELLE FIGURE NEL TESTO

FIGURA 1 - DIFFERENTI TIPOLOGIE DI ONDE DI VOLUME E SUPERFICIE 3
FIGURA 2 - SCHEMATIZZAZIONE PROPAGAZIONE TERRENO-EDIFICIO 6
FIGURA 3 - EFFETTI DI AMPLIFICAZIONE O ATTENUAZIONE DELLE ONDE SISMICHE PRODOTTE DAI SOLAI 7
FIGURA 4 - INQUADRAMENTO GENERALE DELL'AREA OGGETTO DI STUDIO 16
FIGURA 5 - INQUADRAMENTO DELL’AREA CON LIMITI COMUNALI: IL PUNTO ROSSO INDICA L’AREA DI PROGETTO 17
FIGURA 6 - INDIVIDUAZIONE DEL LOTTO ML10X (EX ML10 E ML11) NEL COMPARTO 7B 18
FIGURA 7 – SCHEMA 3D DEL DATACENTER ML10X 19
FIGURA 8 – SCHEMA PLANIMETRICO DEL DATACENTER CON UBICAZIONE DEI GENERATORI ALL'INTERNO DEL LOTTO 20
FIGURA 9 - DISPOSIZIONE GENERATORI (ROSA) CON I CAMINI (ARANCIONE) DEI GAS ESAUSTI 20
FIGURA 10 - RECETTORI INDIVIDUATI NELLA PRIMA FASE DI INDAGINE 22
FIGURA 11 - RECETTORI NELLA FASCIA DEI 200 METRI DALLE AREE DI IMPATTO VIBRAZIONALE 23

1. PREMESSA

Il presente documento è stato predisposto in ottemperanza alle richieste di integrazione formulate dalle Autorità competenti nell'ambito del procedimento di Valutazione di Impatto Ambientale (VIA), ai sensi dell'art. 23 del D.Lgs. 152/2006 e s.m.i., relativo al progetto "*Data Center ML10x nel Comune di Settimo Milanese (già ML10 e ML11)"* nel Comune di Settimo Milanese (MI), proposto da Equinix Hyperscale 2 (ML10) S.r.l. Il progetto era precedentemente indicato come "*Data Center ML10 e ML11"* e ha assunto l'attuale configurazione e denominazione a seguito di una modifica del layout progettuale oggetto del presente studio.

In particolare, il documento risponde alle richieste di documentazione integrativa formulate dal Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) con nota del 15/05/2026, prot. n. 0104129, con specifico riferimento al Capitolo 3 – Vibrazioni:

a. *Il Proponente dovrà predisporre uno studio di compatibilità dell'opera in relazione alle vibrazioni, con stima dei livelli sui recettori individuati nella fase di corso d'opera (in particolare durante le attività di scavo e palificazione CFA), conformemente a quanto previsto dalla norma UNI 9614:2017.*
b. *Si chiede di prevedere durante la fase di corso d'opera un monitoraggio delle vibrazioni presso il recettore più esposto (R1 e/o R5), qualora vengano utilizzate tecniche di scavo o compattazione impattanti.*
c. *Esercizio e Test: Si richiede di integrare la stima dei livelli vibrazionali sui recettori (ai sensi della norma UNI 9614:2017) simulando esplicitamente la fase di test simultaneo dei generatori di emergenza e lo scenario di blackout totale a pieno regime.*

Il presente elaborato si inserisce in tale contesto con l'obiettivo di fornire una valutazione organica e metodologicamente strutturata degli impatti derivanti dalle vibrazioni, in coerenza con le richieste delle Autorità competenti valutando il contributo in termini di vibrazioni in fase di cantiere (scavi, palificazioni, compattazione) e in fase di esercizio a regime (gruppi elettrogeni di emergenza in scenario di blackout totale) per:

- garantire la protezione dei recettori umani esterni ed interni secondo la norma UNI 9614:2017;
- garantire la salvaguardia delle strutture (danni materiali) secondo la norma DIN 4150-3 / UNI 9916.

Il presente documento descrive lo studio di impatto vibrazionale relativamente alla fase di cantiere e della successiva fase in esercizio individuando le azioni di monitoraggio necessarie e le eventuali attività di mitigazione da applicare.

2. CENNI TEORICI SULLE VIBRAZIONI

Le vibrazioni sono oscillazioni meccaniche generate da onde di pressione che si trasmettono attraverso i corpi ovvero è definito vibrazione un fenomeno ondulatorio, generalmente a bassa frequenza, trasmesso attraverso un mezzo solido, liquido o gassoso. Una vibrazione è costituita da una fluttuazione rapida intorno ad una posizione di equilibrio; il movimento netto dell'elemento posto in vibrazione è quindi nullo.

L'oscillazione è il movimento che un punto mobile compie per ritornare alla posizione di partenza. Il tempo che intercorre tra due passaggi nel punto di equilibrio (o punto di partenza) è detto periodo (o ciclo). Il numero di periodi al secondo costituisce la frequenza di una vibrazione, espressa in Hertz (Hz).

In funzione degli effetti fisiopatologici sull'uomo, le vibrazioni sono suddivise in tre principali bande di frequenza:

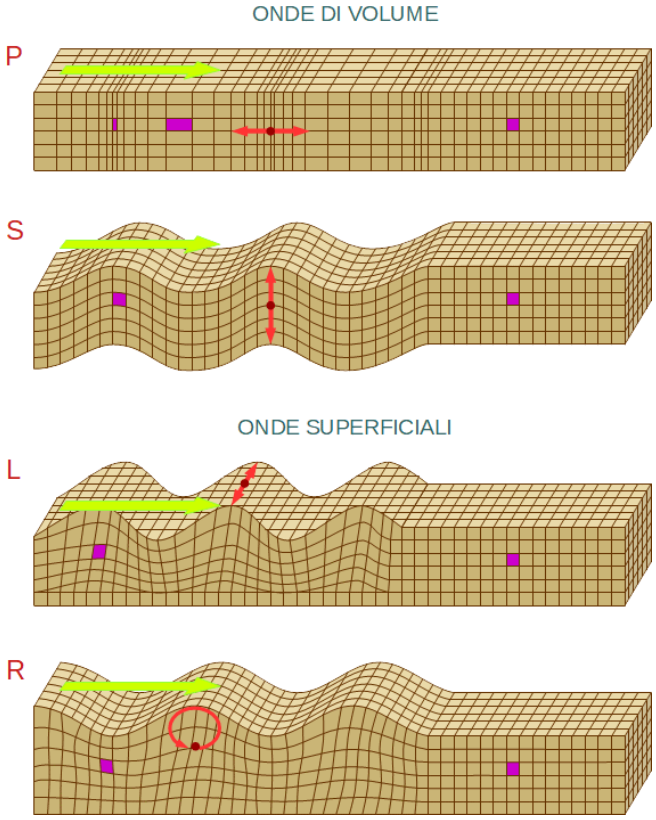
- 0-2 Hz: oscillazioni a bassa frequenza, generate dai mezzi di trasporto (terrestri aerei, marittimi);
- 2-20 Hz: oscillazioni a media frequenza, generate da macchine ed impianti industriali;
- > 20-30 Hz: oscillazioni ad alta frequenza, generate da una gamma ampia di strumenti vibranti diffusi in ambito industriale.

Le vibrazioni sono caratterizzate inoltre da tre ulteriori parametri: l'ampiezza, la velocità e l'accelerazione dello spostamento.

Un'onda è una perturbazione di tipo elastico che si propaga da un punto ad un altro attraversando un materiale oppure sulla superficie dello stesso anche se non è implicito il suo spostamento definitivo.

Le onde si distinguono pertanto in onde di volume ed onde di superficie.

FIGURA 1 - DIFFERENTI TIPOLOGIE DI ONDE DI VOLUME E SUPERFICIE



Tra quelle esistenti, le più veloci sono le onde di compressione (onde P), mentre le onde di taglio (onde S) e di superficie decadono più lentamente con la distanza.

Le vibrazioni possono essere valutate utilizzando tre diverse modalità:

- ✓ in termini di spostamento, ovvero della variazione della posizione dell'elemento indagato rispetto alla posizione di quiete;
- ✓ in termini di velocità, ovvero della variazione dello spostamento rispetto al punto di riferimento, in un determinato intervallo di tempo;
- ✓ in termini di accelerazione, ovvero dalla derivata prima della velocità, che risulta anche la grandezza fisica più facilmente misurabile grazie alla disponibilità di strumenti inerziali efficienti che possiedono sensibilità, risposta in frequenza adeguate, robustezza e facilità d'impego elevata.

In linea di principio il moto può essere misurato attraverso una qualunque delle grandezze cinematiche sopra elencate (accelerazione, velocità, spostamento), ma tra queste l'accelerazione è la grandezza più facilmente misurabile, mentre la velocità è la grandezza generalmente utilizzata per definire parametri e valori di riferimento nella valutazione del danno agli edifici. Dal punto di vista dei potenziali disturbi indotti dalle vibrazioni, i problemi si riscontrano quasi esclusivamente all'interno degli edifici, in quanto le vibrazioni percepite da persone che si trovano in ambiente esterno raramente provocano lamentele. Per questi motivi, è prassi comune misurare direttamente l'accelerazione ed ottenere la velocità per integrazione del segnale.

Gli edifici subiscono effetti che si possono classificare in una scala da non percepibili (livelli di vibrazione bassi), a suoni a bassa frequenza e vibrazioni percepibili (livelli di vibrazione medi) fino a livelli tali da provocare danni alle strutture.

In generale, danni strutturali all'edificio attribuibili a fenomeni vibratori sono estremamente rari e quasi sempre derivano dal concorso di altre cause. Affinché le vibrazioni possano arrecare danni strutturali, è necessario che esse raggiungano livelli tali da causare prima fastidio e disturbo agli occupanti. Sono invece frequenti altre forme di danno, di entità definita "di soglia", che senza compromettere la sicurezza strutturale dell'edificio si presentano sotto forma di fessure negli intonaci o danneggiamenti di elementi architettonici, a cui segue una riduzione del valore economico dell'edificio stesso. A tal proposito, la norma tecnica UNI 9916:2014 definisce danno di tipo architettonico ogni effetto residuo delle vibrazioni in grado di determinare alterazione estetica o funzionale dell'edificio senza comprometterne la stabilità strutturale o la sicurezza degli occupanti. La formazione di fessure più marcate, il distacco e la caduta di gesso o pezzi di intonaco, fino al danneggiamento di elementi strutturali, sono effetti che rientrano invece nella definizione di **danno maggiore**.

I parametri fisici che influenzano le vibrazioni indotte da una sorgente esterna e che via terra raggiungono un edificio si possono dividere in tre categorie:

- ✓ **fattori legati alle sorgenti e alla modalità di operare** - questa categoria include tutti i parametri collegati ai macchinari il cui funzionamento costituisce sorgente di vibrazione. Per esempio, nelle attività connesse alla fase di escavazione e sbancamento si generano tipicamente livelli vibratori di vari gradi in relazione ai macchinari e ai mezzi impiegati. Le attività che tipicamente generano livelli di vibrazioni significative sono associate all'uso di esplosivi e attrezzature d'impatto, quali per esempio la macchina battipalo o il perforatore;
- ✓ **fattori legati alla geologia** - le condizioni del terreno hanno una forte influenza sui livelli vibratori, in particolare la rigidezza e lo smorzamento interno del terreno e la profondità del letto roccioso. Infatti, l'energia immessa nel terreno dalla sorgente genera onde che si propagano modificandosi per effetto delle caratteristiche fisico-meccaniche del terreno attraversato. Il fenomeno si traduce nella generalità dei casi in un'attenuazione dell'intensità all'allontanarsi dalla sorgente, per effetto delle proprietà dissipative del terreno e per un effetto geometrico, ma fattori quali la stratificazione del terreno e la profondità delle falde acquifere possono avere effetti significativi. In generale, il fenomeno della propagazione nel terreno influenza le frequenze più alte e a distanze crescenti dalla sorgente si riscontra uno spettro caratterizzato da un contenuto spettrale sempre più ricco in basse frequenze;
- ✓ **fattori legati all'edificio ricevitore** - le caratteristiche dell'edificio ricevitore stesso sono una componente fondamentale nella valutazione delle vibrazioni. I livelli di vibrazione dentro un edificio dipendono ovviamente dall'energia vibratoria che raggiunge le fondamenta, ma giocano un ruolo fondamentale anche l'accoppiamento tra le fondamenta e il terreno e la propagazione della vibrazione attraverso la struttura dell'edificio. Tali caratteristiche dinamiche dell'edificio

dipendono a loro volta dalle caratteristiche costruttive, sia dell'edificio che delle fondazioni, e dallo stato di conservazione.

La durata, associata all'andamento temporale del fenomeno vibratorio, costituisce un elemento fondamentale per la valutazione del danno, perché da queste grandezze dipende in modo essenziale l'accumulo di danno per fatica dei materiali. In base a ciò, si possono distinguere due categorie di vibrazioni indotte su un edificio ricevitore:

- ✓ **fenomeni di lunga durata (o persistenti),** quando l'eccitazione è continua e presente per lunghi periodi (per es. il traffico stradale su strade di grande comunicazione) ed il fenomeno vibratorio è coincidente con la risposta forzata della struttura. Si annovera in questa categoria anche il caso in cui l'eccitazione sia costituita da una serie discreta di impulsi di durata più o meno variabile che si susseguono ad intervalli brevi (per es. l'eccitazione generata da magli, presse, punzonatrici etc);
- ✓ **fenomeni di breve durata,** quando l'eccitazione è indotta da una forzante di breve durata e che spesso si presenta come un fenomeno isolato (per es. il traffico ferroviario o le esplosioni di mine in una cava). In questi casi perde importanza il fenomeno della fatica e diviene prevalente l'importanza dell'ampiezza massima della sollecitazione indotta.

La caratterizzazione della qualità dell'ambiente in relazione agli effetti delle vibrazioni deve consentire di individuare e stimare le modifiche e/o le interferenze introdotte dall'intervento proposto e valutarne la compatibilità con gli standard esistenti, in riferimento alla verifica sia del disturbo sull'uomo, sia del danno agli edifici per la salvaguardia del patrimonio architettonico/archeologico.

Quando viene imposto sul terreno un prefissato livello di vibrazione, questo si propaga nel mezzo, subendo una attenuazione dipendente da natura del terreno, frequenza del segnale, distanza tra sorgente e ricettore.

Il modello di propagazione valido per tutti i tipi di onde si basa sulla seguente relazione matematica:

$$a(d,f) = a(d_0,f)\cdot\left(\frac{d_0}{d}\right)^n \cdot e^{-2\cdot\pi\cdot f\cdot\eta/c\cdot(d-d_0)}$$

dove:

η = il fattore di perdita del terreno;

c = la velocità di propagazione in m/s;

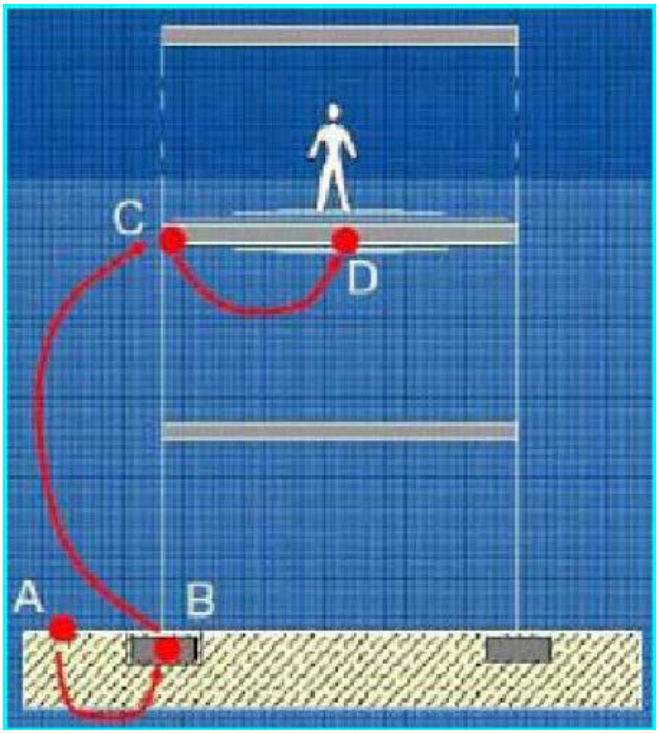
f = la frequenza in Hz;

d = la distanza in m;

d_0 = la distanza di riferimento a cui è noto lo spettro di emissione.

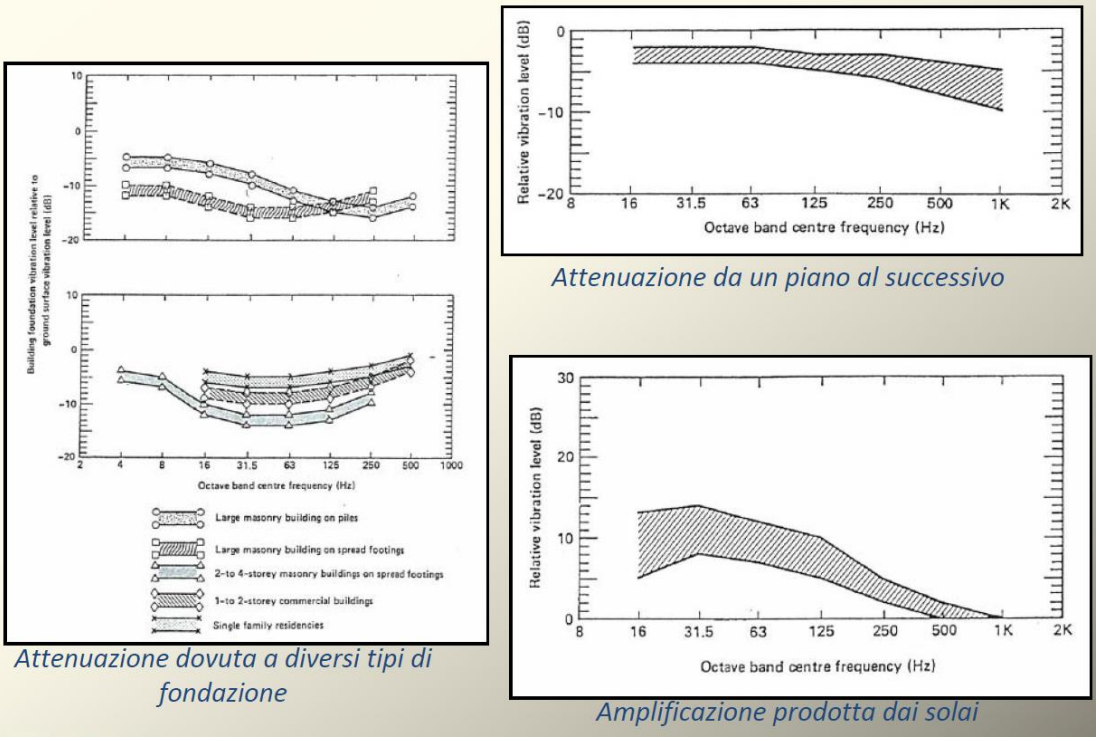
In presenza di edifici con struttura complessa, collegati al terreno attraverso fondazioni, i livelli di vibrazione riscontrabili all'interno delle strutture possono presentare attenuazioni e/o amplificazioni secondo lo schema riportato nell'immagine seguente.

FIGURA 2 - SCHEMATIZZAZIONE PROPAGAZIONE TERRENO-EDIFICIO



Differenti tipologie di fondazioni forniscono diversi effetti di attenuazione o amplificazione del fenomeno vibratorio come evidenziato nelle immagini a seguire:

FIGURA 3 - EFFETTI DI AMPLIFICAZIONE O ATTENUAZIONE DELLE ONDE SISMICHE PRODOTTE DAI SOLAI



Attenuazione dovuta a diversi tipi di fondazione

Attenuazione da un piano al successivo

Amplificazione prodotta dai solai

E' possibile determinare l'accelerazione ad una data distanza mediante il modello semplificato di propagazione che si riferisce ai fenomeni che avvengono nel terreno, ipotizzato omogeneo ed isotropo considerando l'accelerazione di riferimento quella massima ad una data frequenza. In tal caso l'accelerazione può essere definita come:

$$w_2 = w_1 \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^n e^{-\alpha(r_2 - r_1)}$$

Dove:

w_2 e w_1 = rappresentano le ampiezze delle vibrazioni rispettivamente alla distanza r_1 e r_2

n = è il coefficiente di smorzamento geometrico

a = è il coefficiente di smorzamento del materiale.

Il coefficiente di smorzamento geometrico rappresenta l'attenuazione che si verifica a causa della diminuzione della densità di energia all'aumentare della distanza dalla sorgente e può essere determinato conoscendo il tipo onda che si propaga, il tipo di sorgente e il luogo di emissione della vibrazione. Il coefficiente di smorzamento del materiale tiene conto della riduzione di energia delle vibrazioni a causa dell'attrito e della coesione tra le particelle di terreno, essendo quest'ultimo non perfettamente elastico.

Questa attenuazione, dovuta allo smorzamento del materiale, è influenzata dal tipo di terreno e dalla frequenza delle vibrazioni: α può essere calcolato come:

$$a = \frac{\eta}{c}$$

Dove:

h = fattore di perdita del terreno

C = velocità di propagazione dell'onda (m/s)

Ne consegue pertanto che per substrati meno duri (più soffici, con minore presenza di componente rocciosa), il valore di attenuazione del mezzo di propagazione risulta più elevato del corrispondente valore per i substrati duri (rocciosi). Tanto più sarà compatta la roccia del substrato, tanto meno sarà attenuato il fenomeno di propagazione, inoltre l'attenuazione della propagazione risulta essere maggiore per le vibrazioni ad alte frequenze rispetto alle vibrazioni a basse frequenze. Risulta quindi che la maggiore propagazione delle vibrazioni si ottiene in presenza di substrati rigidi con trasmissioni a basse frequenze.

La tabella proposta a seguire evidenzia e sintetizza esempi di valori di velocità di propagazione delle onde longitudinali in relazione ai differenti substrati litologici che si possono incontrare.

TABELLA 1 - VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DELLE ONDE LONGITUDINALI E FATTORE DI PERDITA PER LE DIFFERENTI TIPOLOGIE DI SUBSTRATO LITOLOGICO

Tipologia di substrato	Velocità di propagazione onda longitudinale [m/s]	Fattore di Perdita [η]	Massa volumica [g/cm^3]
Roccioso	3500	0,01	0,1285
Sabbioso	600	0,10	0,0833
Argilloso	1500	0,50	0,0903

Il valore dell'accelerazione determinato in forma semplificata permette di calcolare il livello ponderato di accelerazione da confrontare con i criteri di valutazione del disturbo o del danno degli edifici in base alla loro destinazione d'uso.

3. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

In assenza di normativa nazionale che definisca metodi, indici e limiti al fenomeno vibratorio, la normativa di riferimento in materia di vibrazioni indotte sugli edifici e dei potenziali effetti sugli stessi e sulle persone all'interno è costituita rispettivamente dalla norma tecnica UNI 9916:2014 "*Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni degli edifici*", dalla norma tecnica UNI 9614:2017 "*Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo*" e dalla norma tecnica UNI ISO 2631-2:2018 "*Vibrazioni meccaniche e urti - Valutazione dell'esposizione dell'uomo alle vibrazioni trasmesse al corpo intero - Parte 2: Vibrazioni negli edifici (da 1 Hz a 80 Hz)*".

Tali norme sono distintamente orientate e relative a:

Esposizione Umana:

UNI 9614:2017: Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo.

ISO 2631-2: Valutazione dell'esposizione umana alla vibrazione del corpo intero – vibrazione negli edifici.

Danni ad edifici:

ISO 9916: Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici.

3.1 NORMA UNI ISO 2631-2:2018

La UNI ISO 2631-2 si applica a vibrazioni trasmesse da superfici solide lungo gli assi x, y e z per persone in piedi, sedute o coricate. L'edizione in vigore, emanata nel 2018, annulla e sostituisce le precedenti versioni. Il campo di frequenze considerato è 1-80 Hz e il parametro di valutazione è il valore efficace dell'accelerazione a_w definito come:

$$a_w = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T a_w(t)^2\,dt}$$

dove $a_w(t)$ è l'accelerazione in funzione del tempo, T è la durata dell'integrazione nel tempo dell'accelerazione.

Il livello di accelerazione viene espresso in dB come:

$$Lw = 20 \times Log\frac{a_w}{a_0}$$

dove a_0 è il valore dell'accelerazione di riferimento, pari a 10^{-6} m/s^2.

La funzione $a_w(t)$ si ottiene dalla funzione a(t), ossia dall'andamento temporale dell'accelerazione del punto materiale (time history), applicando i filtri di frequenza.

I filtri di ponderazione tengono conto della sensibilità dell'uomo alle vibrazioni e dipende dalla frequenza delle stesse. In tal senso i filtri di ponderazione frequenza per frequenza rendono tutte le componenti dello spettro equivalenti in termini di percezione e quindi di disturbo.
Poiché la sensibilità dell'uomo alle vibrazioni dipende anche dalla direzione di propagazione della stessa nel corpo, i filtri sono riportati separatamente per vibrazioni lungo l'asse z e lungo gli assi x e y. Nel caso la postura del soggetto esposto non sia nota viene indicato un filtro apposito.
La norma individua una soglia di percezione delle vibrazioni (che varia a seconda della frequenza considerata e dell'asse di riferimento) ed una soglia di percezione cumulativa da confrontarsi con i valori di accelerazione ponderata in frequenza secondo opportuni filtri di pesatura.
Tale soglia, come dimostrano le tabelle che seguono, si pone a $5*10^{-3}$ m/s^2 (74 dB) per l'asse z e a $3,6*10^{-3}$ m/s^2 (71 dB) per gli assi x e y.

TABELLA 2 - VALORI E LIVELLI LIMITE DELLE ACCELERAZIOI COMPLESSIVE PONDERATE

VALORI E LIVELLI LIMITE DELLE ACCELERAZIONI COMPLESSIVE PONDERATE IN FREQUENZA VALIDI PER L'ASSE z		
Destinazione d'uso	Accelerazione	
	m/s²	dB
Aree critiche	$5,0\ 10^{-3}$	74
Abitazioni notte	$7,0\ 10^{-3}$	77
Abitazioni giorno	$10,0\ 10^{-3}$	80
Uffici	$20,0\ 10^{-3}$	86
Fabbriche	$40,0\ 10^{-3}$	92

VALORI E LIVELLI LIMITE DELLE ACCELERAZIONI COMPLESSIVE PONDERATE IN FREQUENZA VALIDI PER GLI ASSI x E y		
Destinazione d'uso	Accelerazione	
	m/s²	dB
Aree critiche	$3,6\ 10^{-3}$	71
Abitazioni notte	$5,0\ 10^{-3}$	74
Abitazioni giorno	$7,0\ 10^{-3}$	77
Uffici	$14,4\ 10^{-3}$	83
Fabbriche	$28,8\ 10^{-3}$	89

Nel caso di vibrazioni di livello non costante il parametro da rilevare, in un intervallo di tempo rappresentativo, è l'accelerazione equivalente $a_{w,eq}$ o il livello equivalente dell'accelerazione $L_{W,eq}$ così definiti:

$$a_{W.eq} = \left[\left(\frac{1}{T} \right) \int_0^T [a_W(t)]^2 \, dt \right]^{0.5}$$

$$L_{W.eq} = 10 \log \left[\left(\frac{1}{T} \right) \int_0^T [a_W(t) / a_o]^2 \, dt \right]$$

Dove $a_W(t)$ è il valore "istantaneo" dell'accelerazione ponderata in frequenza, T è la durata del rilievo e a_0 è il valore dell'accelerazione di riferimento, pari a 10^{-6} m/s^2.
Per la valutazione del disturbo, i valori dell'accelerazione equivalente ponderata in frequenza o i corrispondenti livelli possono essere confrontati con i limiti riportati nelle due tabelle precedenti. Fenomeni vibratori caratterizzati dal superamento di predetti limiti, possono essere considerati oggettivamente disturbanti per l'individuo esposto.
Il giudizio sull'accettabilità (tollerabilità) del disturbo riscontrato dovrà tenere conto di fattori quali la frequenza con cui si verifica il fenomeno vibratorio, la sua durata, etc.
I parametri indicati devono essere valutati nel punto esatto in cui la vibrazione interessa l'individuo. Nel caso in cui la posizione dell'individuo non sia nota o sia variabile, la misura va eseguita al centro della stanza.

3.2 NORMA UNI 9614:2017

La norma definisce il metodo di misurazione delle vibrazioni immesse negli edifici ad opera di sorgenti interne o esterne agli edifici e i criteri di valutazione del disturbo delle persone all'interno degli edifici stessi. La norma modifica, in modo sostanziale, la versione precedente introducendo un approccio innovativo e profondamente diverso nelle modalità di valutazione dei disturbi da vibrazione.
Essa fa riferimento alla UNI ISO 2631-2:2003, aggiornata poi nel 2018, prevalentemente per i metodi di misurazione e valutazione.
La norma si applica a tutti i fenomeni che possono dare origine a vibrazioni negli edifici; a titolo esemplificativo e non esaustivo: traffico su gomma e su rotaia, attività industriali e funzionamento di macchinari, attività stradali e di cantiere di varia natura, esplosioni e scoppi, attività umane di qualsiasi natura.
Le norme UNI 9614:2017 e UNI ISO 2631-2 caratterizzano la vibrazione di livello non costante, quale quella proveniente dal transito dei veicoli metropolitani, attraverso l'espressione del livello di accelerazione "a".
Considerando cumulativo l'effetto di tutte le componenti di accelerazione per frequenze da 1 a 80 Hz vanno introdotti opportuni filtri di ponderazione che rendano tali componenti equivalenti dal punto di vista di percezione da parte dell'individuo (filtri di ponderazione forniti nell'Annex A

della UNI ISO 2631-2).

Il livello dell'accelerazione complessiva ponderata in frequenza Lw è fornito dalla relazione:

$$L_W = 10 \cdot (\mathrm{Log}_{10} \sum_i 10^{\frac{L_{i,W}}{10}})$$

Dove Li,w sono i livelli di vibrazione in accelerazione calcolati per terzi di ottava.
La norma UNI 9614 infine:

- introduce i criteri per la scelta della strumentazione di misura, per il confronto con le vibrazioni residue e per la compilazione del report di misura;
- suddivide la giornata secondo due periodi di riferimento, dalle 6.00 alle 22.00 (periodo diurno) e dalle 22.00 alle 6.00 (periodo notturno). Sono considerate frequenze da 1 a 80 Hz.

3.2.1 LIMITI DI ACCELERAZIONE MASSIMA PONDERATA (NORMA UNI 9614)

La norma UNI 9614:2017 riporta, per la valutazione del disturbo, i limiti di riferimento per l'accelerazione massima ponderata della sorgente *(V_{Sor})* in funzione del tipo di edificio, della sua destinazione d'uso e dei diversi periodi della giornata come riportato nella seguente tabella.

TABELLA 3 - LIMITI DI RIFERIMENTO DELLA MASSIMA ACCELERAZIONE PONDERATA DELLA SORGENTE

Edificio	Limite diurno [mm/s²]	Limite diurno festivo [mm/s²]	Limite notturno [mm/s²]
Ospedali, case di cura e affini	2,0	2,0	2,0
Asili e case di riposo	3,6	3,6	3,6
Scuole	5,4	-	-
Abitazioni	7,2	5,4	3,6
Luoghi lavorativi	14,0	14,0	14,0

3.3 NORMA UNI 9916:2014

La norma tecnica UNI 9916:2014 descrive le metodologie appropriate per la misurazione, il trattamento dei dati finalizzati alla valutazione della potenzialità delle vibrazioni di causare danni di tipo architettonico agli edifici. La norma si applica in generale a tutte le tipologie di edifici e fornisce i valori indicativi di riferimento. Relativamente a tali valori di riferimento, la norma sottolinea che tali valori non possono essere considerati come limiti assoluti di accettabilità o non accettabilità del fenomeno vibratorio e che resta onere dello sperimentatore formulare il suo giudizio sulla base di una accurata valutazione di tutti i dati raccolti. Nel prosieguo del presente documento si utilizzerà il termine "limiti" per semplicità di lettura.

La norma considera per semplicità gamme di frequenza variabili da 0.1 Hz a 150 Hz. Tale

intervallo interessa una grande casistica di edifici e di elementi strutturali di edifici sottoposti ad eccitazione naturale o causata dall'uomo (traffico, attività di costruzione, ecc.). In alcuni casi l'intervallo di frequenza delle vibrazioni può essere più ampio; tuttavia, le eccitazioni con contenuto in frequenza superiore a 150 Hz non sono tali da influenzare significativamente la risposta dell'edificio.

Agli scopi della norma è adottata la seguente classificazione in tipologie di **edificio**:

- ✓ costruzioni industriali e costruzioni strutturalmente simili;
- ✓ costruzioni residenziali e costruzioni strutturalmente simili;
- ✓ costruzioni che, per la loro sensibilità particolare alle vibrazioni, non rientrano nella precedente classificazione o sono di grande valore intrinseco (per es. edifici monumentali).

Le modalità di trattamento dei dati dipendono dalla natura dei segnali da analizzare, dalle finalità che l'elaborazione si prefigge e dall'accuratezza richiesta. Nel caso estremamente comune della determinazione della velocità, secondo cui sono espressi i limiti previsti dalla norma, a partire da un segnale di accelerazione, la procedura di integrazione consigliata opera nel dominio del tempo con due passaggi successivi:

- ✓ uso di un filtro passa alto per l'eliminazione del rumore di natura elettrica a bassa frequenza;
- ✓ l'integrazione del segnale filtrato, per esempio con il metodo dei trapezi.

La **velocità di picco puntuale** ("peak particle velocity", anche detta p.p.v.) è definita come il valore massimo del modulo vettore velocità misurato o ottenuto per integrazione in un dato punto. La determinazione della velocità di picco puntuale richiede la misurazione simultanea delle tre componenti mutuamente perpendicolari della velocità nel punto considerato. In particolare, le tre componenti devono essere combinate vettorialmente per determinare istante per istante il modulo della velocità risultante, che deve essere confrontato con il valore della velocità di soglia di riferimento.

La **velocità di picco di una componente puntuale** ("peak component particle velocity", anche detta p.c.p.v.) è definita come il valore massimo del modulo di una delle tre componenti ortogonali misurate simultaneamente in un punto e ottenute mediante integrazione.

3.3.1 LIMITI VELOCITÀ DI VIBRAZIONE (NORMA UNI 9916)

Ai fini della valutazione della possibilità di danno architettonico, nei casi generali, la norma UNI 9916 raccomanda di fare riferimento alla norma tecnica DIN 4150 parte 3, la quale utilizza la velocità di picco di una componente puntuale (p.c.p.v.) e stabilisce dei valori limite per ciascuna delle tre tipologie di edificio. Inoltre, la norma tecnica DIN 4150 parte 3 prevede, ove possibile, la misurazione della vibrazione sia alla base dell'edificio che ai piani superiori, con particolare riferimento al piano più elevato per quanto riguarda le componenti orizzontali della velocità.

I limiti, per quanto riguarda sia le misurazioni alla base dell'edificio sia le componenti orizzontali della velocità ai piani superiori sono riportati nella seguente tabella.

TABELLA 4 - VALORI DI RIFERIMENTO PER LA VELOCITÀ DI VIBRAZIONE (P.C.P.V.) AL FINE DI VALUTARE L'AZIONE DELLE VIBRAZIONI DI BREVE DURATA SULLE COSTRUZIONI

Classe	Tipo di edificio	Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.c.p.v in mm/s			
		Fondazioni			Piano alto
		Da 1 Hz fino a 10 Hz	Da 10 Hz fino a 50 Hz	Da 50 Hz fino a 100 Hz*)	Per tutte le frequenze
1	Costruzioni industriali, edifici industriali e costruzioni strutturalmente simili	20	Varia linearmente da 20 (f= 10 Hz) fino a 40 (f= 50 Hz)	Varia linearmente da 40 (f= 50 Hz) fino a 50 (f= 100 Hz)	40
2	Edifici residenziali e costruzioni simili	5	Varia linearmente da 5 (f= 10 Hz) fino a 15 (f= 50 Hz)	Varia linearmente da 15 (f= 50 Hz) fino a 20 (f= 100 Hz)	15
3	Costruzioni che non ricadono nelle classi 1 e 2 e che sono degne di essere tutelate (per esempio monumenti storici)	3	Varia linearmente da 3 (f= 10 Hz) fino a 8 (f= 50 Hz)	Varia linearmente da 8 (f= 50 Hz) fino a 10 (f= 100 Hz)	8
*)	Per frequenze oltre 100 Hz possono essere usati i valori di riferimento per 100 Hz.				

In presenza di vibrazioni continue che possano indurre fenomeni di fatica o amplificazioni dovute a risonanza nella struttura interessata, i valori di riferimento per le componenti orizzontali del moto sono indicati nella figura successiva e sono indipendenti dal contenuto in frequenza del segnale.

TABELLA 5 - VALORI DI RIFERIMENTO PER LE COMPONENTI ORIZZONTALI DELLA VELOCITÀ DI VIBRAZIONE (P.C.P.V.) AL FINE DI VALUTARE L'AZIONE DELLE VIBRAZIONI DURATURE SULLE COSTRUZIONI

Classe	Tipo di edificio	Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.c.p.v. in mm/s (per tutte le frequenze)
1	Costruzioni industriali, edifici industriali e costruzioni strutturalmente simili	10
2	Edifici residenziali e costruzioni simili	5
3	Costruzioni che non ricadono nelle classi 1 e 2 e che sono degne di essere tutelate (per esempio monumenti storici)	2,5

Questi valori di riferimento sono utilizzabili per tutti i piani e per le fondazioni; in generale risulterà più significativa la misurazione al piano alto, ma non sono da escludere controlli ai piani intermedi o in fondazione qualora vi sia la possibilità di risonanza. Per la componente verticale

dei singoli solai, la norma indica come valore di riferimento per la p.c.p.v. 10 mm/s limitatamente alle prime due classi di edifici. Tale limite è indipendente dal contenuto in frequenza della registrazione e può essere inferiore per la terza classe di edifici.

3.4 ALTRE NORME

Per quanto concerne il progetto in oggetto vengono tenute in considerazione anche le norme relative alle specifiche tematiche dell'opera da realizza tra cui:

DIN 4150-3: Vibrations in buildings - Part 3: Effects on structures.

Telcordia GR-63-CORE / ASHRAE TC 9.9: Requisiti di resistenza a vibrazioni/shock perrack IT e server in Data Center.

ISO 8528-9: Gruppi elettrogeni a corrente alternata guidati da motori alternativi a combustione interna – Misurazione e valutazione delle vibrazioni meccaniche.

Esistono infine altre norme internazionali specifiche per lo studio del controllo vibrazionale determinato dall'effetto dovuto alla battitura di pali (Norma BS 5228 parte 4 - "Noise control on construction and open sites - Code of practice for noise and vibration control applicable to piling operations", 1992) o dovuto all'effetto dello scoppi di mine (Norma SN 640312 - "Effet des ébranlements sur les constructions", 1992) le quali non verranno trattare nella presente relazione in quanto non attinenti alle attività da eseguire sia in fase di realizzazione sia in fase di esercizio.

4. INQUADRAMENTO GENERALE

L'area ove realizzare le opere oggetto del presente studio vibrazionale è posta all'interno dell'area industriale Il Castelletto nel territorio del comune di Settimo Milanese (MI) in un lotto precedentemente occupato dallo stabilimento produttivo Italtel, attualmente in gran parte dismesso.

FIGURA 4 - INQUADRAMENTO GENERALE DELL'AREA OGGETTO DI STUDIO

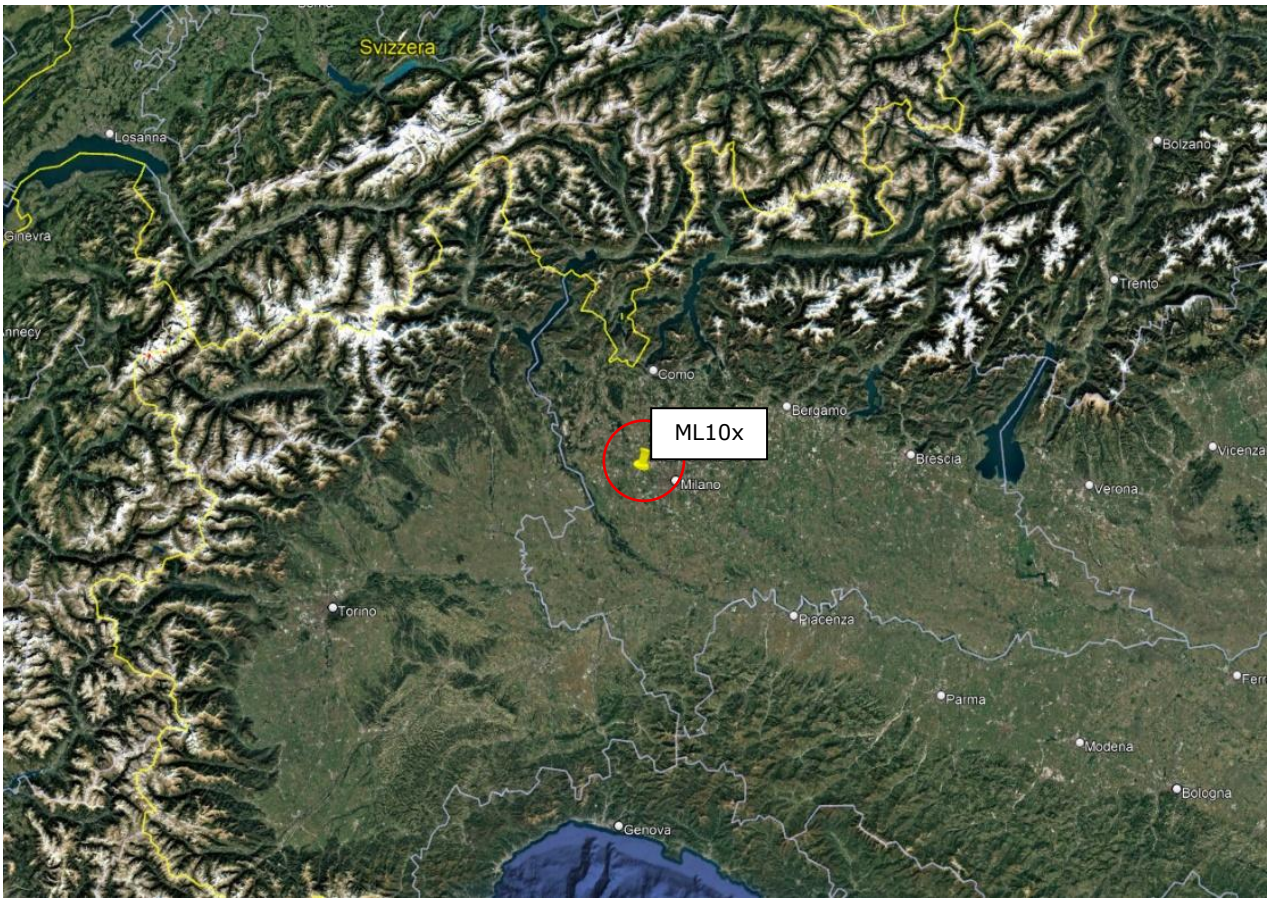
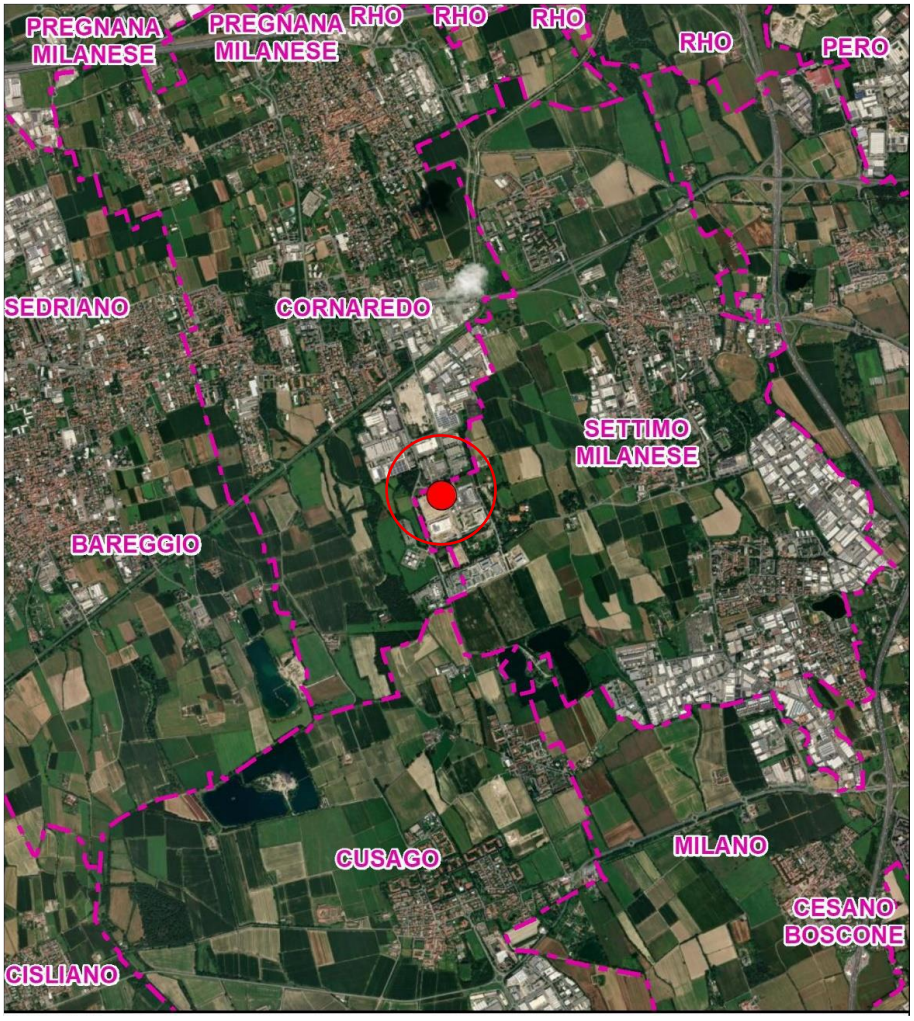


FIGURA 5 - INQUADRAMENTO DELL'AREA CON LIMITI COMUNALI: IL PUNTO ROSSO INDICA L'AREA DI PROGETTO

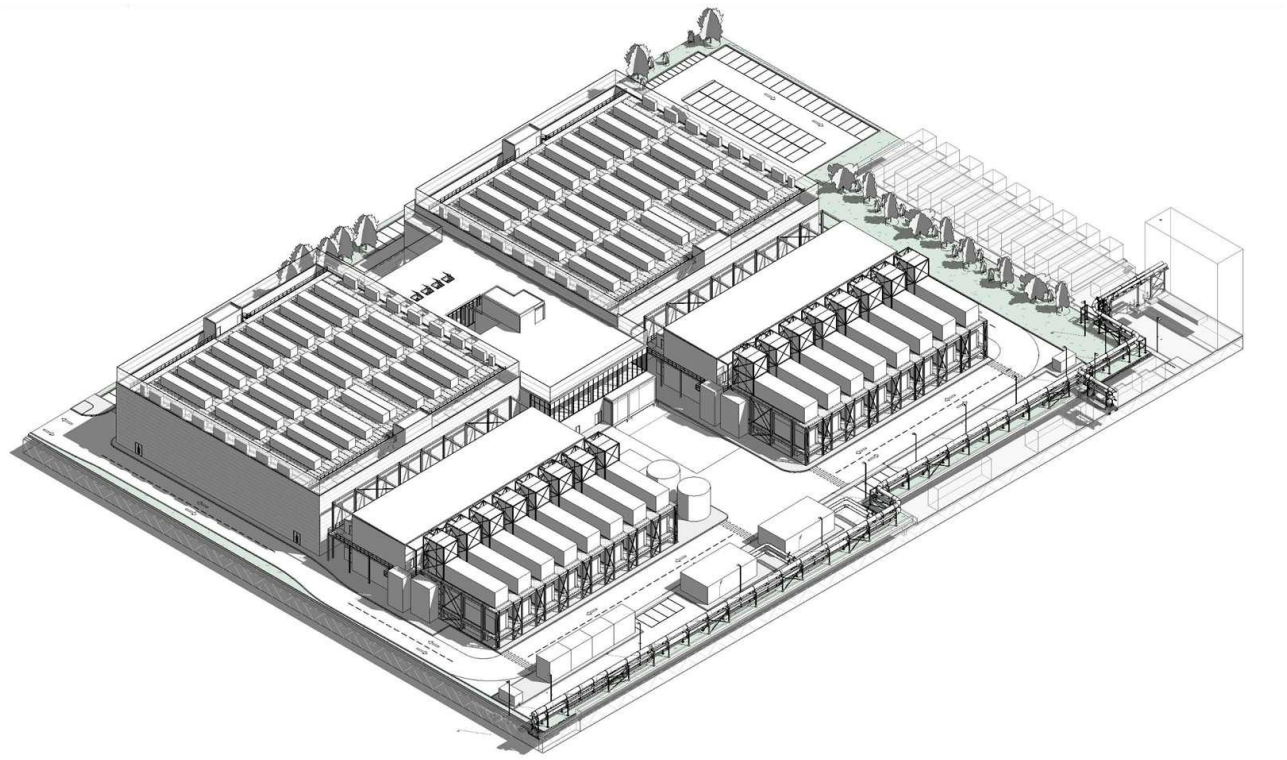


Il lotto in oggetto ricade all'interno del comparto 7B, come definito dalla variante al Piano Attuativo "Castelletto Uno" del 2022, la quale prevede il completamento e il potenziamento dell'insediamento di funzioni ad alto contenuto tecnologico.

FIGURA 6 - INDIVIDUAZIONE DEL LOTTO ML10X (EX ML10 E ML11) NEL COMPARTO 7B

Il progetto prevede la realizzazione di un DataCenter su un'area prettamente pianeggiante e rettangolare, delimitata a nord da via privata Marisa Bellisario, ad ovest da via Monzoro, a sud dall'area occupata dal lotto di proprietà di Vantage DC e ad est dal lotto di proprietà di Equinix Italia.

FIGURA 7 – SCHEMA 3D DEL DATACENTER ML10X



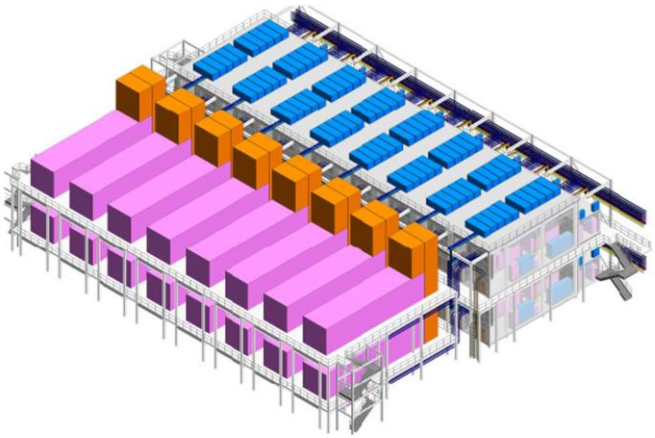
Nello specifico si prevede la realizzazione di due edifici destinati al contenimento dei server (Data Hall), collegati tra loro da un edificio destinato agli uffici. Ciascun Data Hall sarà dotato di un fabbricato generatori. I generatori sono installati su due livelli, in corrispondenza di ciascuna cella. Ogni livello ospita 8 generatori per cella, per un totale complessivo di 32 generatori.

Ogni cella sarà dotata di 16 generatori, distribuiti tra il piano terra e il primo piano di una struttura dedicata. Al di sotto dei generatori installati al piano terra saranno collocati due belly tank, ciascuno dei quali sarà in grado di alimentare un gruppo elettrogeno. Ogni generatore è dotato di un serbatoio da 50 m^3, con una capacità netta di 40 m^3 (comprensivi di 2000 litri di daily tank).

Ogni generatore sarà posizionato fianco a fianco ad un altro generatore con una distanza minima di 3 metri per rispetto delle normative di prevenzione incendio. La distanza minima richiesta tra i generatori e gli edifici è pari a 5,00 m.

FIGURA 8 – SCHEMA PLANIMETRICO DEL DATACENTER CON UBICAZIONE DEI GENERATORI ALL'INTERNO DEL LOTTO

FIGURA 9 - DISPOSIZIONE GENERATORI (ROSA) CON I CAMINI (ARANCIONE) DEI GAS ESAUSTI



Sul tetto di ogni edificio principale sono posizionati ulteriori locali tecnici containerizzati contenenti trasformatori, UPS e relative batterie al litio e quadri elettici che provvedono a mantenere in funzione l'intero edificio; in copertura sono inoltre collocati due locali tecnici che

ospitano rispettivamente condensatori per le unità di raffreddamento interno e quadri per la connettività delle apparecchiature, oltre che un'unità di ventilazione a servizio degli uffici.

Per garantire l'operatività dei Data Center anche in caso di problemi di rete si prevede l'installazione per ciascuna unità, di 16 gruppi elettrogeni di emergenza (32 in totale) per una potenza complessiva pari a circa 216 MWt, unitamente a 25 gruppi di accumulo di energia statici (50 in totale).

L'utilizzo dei gruppi elettrogeni è previsto esclusivamente in caso di emergenza, rappresentata dalla indisponibilità di alimentazione tramite l'allaccio alla rete elettrica nazionale. In caso di mancanza dalla rete nazionale, tali gruppi elettrogeni saranno in grado di attivarsi automaticamente.

5. INDIVIDUAZIONE DEI RECETTORI

Già in una prima fase previsionale è stato eseguito uno screening per l'individuazione degli edifici sia abitativi sia non abitativi presenti nell'area in esame sui quali concentrare l'attività di valutazione dell'impatto in termini vibrazionali sia per le attività di cantiere sia per quelle di esercizio.

Con specifica comunicazione della Commissione tecnica di verifica dell'impatto ambientale VIA e VAS protocollo n. 104129 del 15-05-2026, ai fini della valutazione previsionale dell'impatto vibrazionale, è stato richiesto uno studio di compatibilità dell'opera in relazione alle vibrazioni, con stima dei livelli sui recettori individuati nella fase di corso d'opera (in particolare durante le attività di scavo e palificazione CFA), conformemente a quanto previsto dalla norma UNI 9614:2017 prevedendo inoltre, durante tale fase, un monitoraggio delle vibrazioni presso il recettore più esposto (R1 e/o R5), qualora vengano utilizzate tecniche di scavo o compattazione impattanti, integrando la stima dei livelli vibrazionali sui recettori (ai sensi della norma UNI 9614:2017) e infine simulando esplicitamente la fase di test simultaneo dei generatori di emergenza (fino a 4 generatori) e lo scenario di blackout totale a pieno regime.

FIGURA 10 - RECETTORI INDIVIDUATI NELLA PRIMA FASE DI INDAGINE

Ai fini della presente valutazione vibrazionale è stata eseguita un'attenta ed ulteriore analisi del territorio circostante il Data Center valutando la presenza di eventuali altri recettori nell'area in esame. La distanza di indagine è stata scelta in funzione della tipologia di vibrazioni prodotte dai macchinari più impattanti che saranno utilizzati in fase di cantiere e in fase di esercizio per i quali si può stimare un livello di accelerazione ponderata in frequenza Law,5m=90,0 dB (rif. *A. Farina "Valutazione dei livelli di vibrazioni in edifici residenziali, Normativa, tecniche di misura e di*

calcolo", neo- Eubios n. 16 (2006)] misurato a distanza di 5 m dal centro della sorgente. Questo livello tiene conto dei contribuiti di accelerazione ponderata nei tre assi di propagazione (x, y e z).

FIGURA 11 - RECETTORI NELLA FASCIA DEI 200 METRI DALLE AREE DI IMPATTO VIBRAZIONALE

Da tale analisi si è potuto constatare che l'area destinata ad ospitare il Data Center individua nella fascia dei 200 metri una serie di immobili destinati principalmente ad attività industriale oltre ad un fabbricato posto al margine della fascia di 200 metri, individuato come recettore R5, destinato ad attività di ristorazione e tavola calda sul quale saranno concentrate le principali attività di verifica.

Saranno infine sottoposti a verifica anche gli immobili denominati R1 e R2 i quali, pur essendo posti a maggiore distanza (circa 360 metri R1 e circa 400 metri R2), potrebbero essere interessati dagli effetti vibrazionali a causa della loro destinazione d'uso.

6. VALUTAZIONE DELL'ENTITÀ DELLE VIBRAZIONI AI RECETTORI

La valutazione previsionale per la stima dell'entità delle vibrazioni che possono essere indotte ai recettori individuati è stata effettuata mediante un modello di propagazione classico, che considera un modello semplificato e che risulta cautelativo in assenza di particolari risonanze indotte dalla stratigrafia del terreno.

Ai fini dell'esecuzione dell'analisi in frequenza della risposta strutturale, si utilizza il parametro velocità secondo la normativa UNI 9916, mentre per la valutazione del disturbo provocato agli occupanti degli edifici interessati dalla propagazione di vibrazioni secondo la norma UNI 9614:2017 si preferisce misurare l'accelerazione ponderata in frequenza.

I limiti di riferimento massimi per la massima accelerazione ponderata della sorgente sono:

TABELLA 6 - LIMITI DI RIFERIMENTO PER LA MASSIMA ACCELERAZIONE PONDERATA DELLA SORGENTE DEFINITI DALLA NORMA UNI 9614:2017

Edificio	Limite diurno [mm/s²]	Limite diurno festivo [mm/s²]	Limite notturno [mm/s²]
Ospedali, case di cura e affini	2,0	2,0	2,0
Asili e case di riposo	3,6	3,6	3,6
Scuole	5,4	-	-
Abitazioni	7,2	5,4	3,6
Luoghi lavorativi	14,0	14,0	14,0

L'accelerazione ad una data distanza sarà calcolata mediante il modello semplificato di propagazione che è definito come:

$$A = A_0 * exp^{(-\eta * d)}$$

Dove:

A = Accelerazione alla distanza d;

A_0 = Accelerazione al suolo causata dai macchinari;

η = il fattore di perdita del terreno;

d = la distanza in m.

6.1 STIMA PREVISIONALE DELLE VIBRAZIONI IN FASE DI CANTIERE

Al fine di analizzare le possibili vibrazioni meccaniche trasmesse per via ambientale durante le diverse fasi di cantiere è stato possibile individuare quelle che potenzialmente sono maggiormente impattanti dal punto di vista della possibile emissione e trasmissione delle vibrazioni ambientali le quali possono essere quelle per la lavorazione di demoliti, terre, calcestruzzi, oltre alle componenti, la realizzazione dei pali, i demolitori, ecc.

Tali macchinari possono essere classificati principalmente nelle seguenti categorie:

- macchine per la movimentazione della terra (bulldozer, spalatrici, ruspe, rulli compressori);
- macchine per la movimentazione dei materiali (gru, autobetoniere);
- macchine stazionarie (pompe, generatori, compressori);
- trivelle CFA (Continuous Flight Auger o elica continua);
- demolitori.

Si riportano nella tabella seguente le attività di cantiere e i relativi macchinari:

TABELLA 7 - ATTIVITÀ DI CANTIERE E RELATIVI MACCHINARI

Attività	Macchinari considerati
Installazione cantiere	Autocarro, autogru, escavatore gommato, martello demolitore elettrico, smerigliatrice a disco, trapano, motogeneratore.
Scavi di sbancamento/ movimentazione terra	Autocarro, escavatore, pala meccanica
Stabilizzatura e compattatura	Pala meccanica, autocarro, rullo compressore
Fresature	Fresa, autocarro, spazzolatrice
Pali	Macchinari per pali
Demolizioni	Escavatore con martello demolitore, autocarro
Strutture in c.a.	Autobetoniera, autocarro, autopompa
Opere complementari e di finitura	Autocarro, spazzolatici

Allo scopo di poter valutare la potenziale trasmissione delle vibrazioni meccaniche ambientali, nella tabella che segue sono riportati i livelli attesi a 10 metri dalle lavorazioni, indicativi per le diverse tipologie macchine generalmente utilizzate in cantiere.

TABELLA 8 - LIVELLI DI EMISSIONE VIBRATORIA AMBIENTALE GENERATI DA ALCUNI MACCHINARI DI CANTIERE (A 10 M. DALLA SORGENTE) - (FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION'S MANUAL FOR TRANSIT NOISE AND VIBRATION IMPACT ASSESSMENT AND FEDERAL RAILROAD)

Macchinari		**Livelli di emissioni vibratoria [mm/s²]**	**Livelli di emissioni vibratoria [m/s²]**	**La (dB)**
Macchine movimento terra	Rullo compressore	21.2	0.0212	86.5
	Caricatori	2.2	0.0022	66.8
	Scavatrici	7	0.007	76.9
	T rettori	8.1	0.0081	78.2
	Ruspe, livellatrici	5.6	0.0056	75.0
	Pavimentatrici	7.9	0.0079	78.0
	Autocarri	4.2	0.0042	72.5
Macchine movimento materiali	Gru semoventi	//	//	//
Macchine stazionarie	Pompe	0.8	0.0008	58.1
	Generatori	1.1	0.0011	60.8
	Compressori	0.6	0.0006	55.6
Macchine impattanti	Imbullonatrici	12.6	0.0126	82.0
	Martelli pneumatici e perforatrici	14.8	0.0148	83.4
	Battipalo	19.4	0.0194	85.8
Altri	Seghe	//	//	//

Dalla tabella sopra riportata si evince che i macchinari che producono i maggiori livelli di emissione vibratoria sono le macchine di movimento terra o quelle impattanti che raggiungono valori dello stesso ordine di grandezza di quello individuato in precedenza pari a Law,5m=90,0 dB (rif. *A. Farina "Valutazione dei livelli di vibrazioni in edifici residenziali, Normativa, tecniche di misura e di calcolo", neo- Eubios n. 16 (2006)*] misurato a distanza di 5 m dal centro della sorgente.

Il parametro di riferimento da utilizzare per i recettori come riferito in precedenza è quello definito dalla norma secondo la norma UNI 9614:2017 i cui livelli massimi di accelerazione ponderata sono:

TABELLA 9 - LIMITI DI RIFERIMENTO MASSIMI PER LA MASSIMA ACCELERAZIONE PONDERATA DELLA SORGENTE DEFINITI DALLA NORMA UNI 9614:2017

Edificio	Limite diurno [mm/s²]	Limite diurno festivo [mm/s²]	Limite notturno [mm/s²]
Ospedali, case di cura e affini	2,0	2,0	2,0
Asili e case di riposo	3,6	3,6	3,6
Scuole	5,4	-	-
Abitazioni	7,2	5,4	3,6
Luoghi lavorativi	14,0	14,0	14,0

Volendo trattare i recettori individuati come abitazioni i livelli di riferimento da considerare sono:

Limite diurno [mm/s²] = 7,2 = 0,0072 m/s²

Limite notturno [mm/s²] = 3,6 = 0,0036 m/s²

Il livello di accelerazione viene espresso in dB come:

$$Lw = 20 \times Log \frac{a_w}{a_0}$$

dove a_0 è il valore dell'accelerazione di riferimento, pari a 10^{-6} m/s².

Da cui si otterrà che:

Limite diurno (dB) = 77,14

Limite notturno (dB) = 77,12

Poiché i limiti di disturbo umano sono di gran lunga inferiori a quelli relativi alla valutazione della potenzialità delle vibrazioni di causare danni di tipo architettonico agli edifici, il rispetto dei primi garantisce gli edifici da eventuali danni di tipo architettonico.

I fattori di perdita sono invece quelli definiti dalla tabella 10:

TABELLA 10 - FATTORI DI PERDITA PER TIPOLOGIA DI SUBSTRATO

Tipologia di substrato	Velocità di propagazione onda longitudinale [m/s]	Fattore di Perdita [η]	Massa volumica [g/cm³]
Roccioso	3500	0,01	0,1285
Sabbioso	600	0,10	0,0833
Argilloso	1500	0,50	0,0903

Le attività di cantiere sono svolte esclusivamente durante il periodo diurno quindi, per le tre tipologie di suolo, si otterrà che la distanza minima da rispettare per le abitazioni (Uni 9614) oltre la quale le vibrazioni trasmesse sono al di sotto dei valori saranno pari a:

Tipologia di substrato roccioso: Distanza = 20,4 metri

Tipologia di substrato sabbioso: Distanza minima = 6,5 metri

Tipologia di substrato argilloso: Distanza minima = 5,3 metri

Poiché il livello vibrazionale di misura è pari a Law,5m=90,0 dB cioè determinato ad una distanza di 5 metri dal punto di generazione della vibrazione i valori sopra determinati sono comprensivi di tale distanza.

Da tale analisi eseguita nell'area di cantiere e nell'intorno di essa è quindi possibile escludere in via previsionale qualsiasi azione di disturbo vibrazionale sui recettori individuati poiché posti a distanze superiori. Al fine di confermare tale analisi sarà comunque utile e necessario avviare un idoneo piano di monitoraggio ambientale in fase di cantiere per valutare gli esatti valori vibrazionali che potrebbero generare disturbi all'uomo o danni strutturali agli edifici.

6.2 STIMA PREVISIONALE DELLE VIBRAZIONI IN FASE DI ESERCIZIO

Al fine di valutare in termini quantitativi la distanza alla quale l'entità delle vibrazioni generate dal funzionamento a regime del Data Center possa ritenersi tale da non arrecare disturbo alle attività circostanti, alla popolazione umana ed ai recettori in generale, sarà applicato il modello di calcolo appena esposto, utilizzando come dato di input i valori di vibrazione riferiti ad impianti similari ed associando gli stessi alla condizione in oggetto. La valutazione in assenza di dati misurati rende necessario applicare un dato di partenza conservativo al fine di ottenere risultati cautelativi per la valutazione della vibrazione sui recettori. Per i generatori elettrici, che come di seguito esplicitato rappresentano la principale sorgente di vibrazioni nella fase di esercizio del Data Center, è stata applicata la seguente considerazione. Dalla Tabella 8 si evince che i generatori elettrici presentano un valore di velocità vibrazionale, misurata a 10 metri, pari a 1,1 mm/s. Pur essendo generatori elettrici di minore potenza i generatori di cantiere non presentano le caratteristiche di smorzamento ed attenuazione dei generatori containerizzati ed a isolamento integrato, inoltre la misura della velocità di vibrazione è misurata a 10 metri di distanza dalla massa vibrante. Considerando tutto ciò si può ritenere estremamente cautelativo stabilire un valore della velocità di vibrazione del generatore di progetto (fase di esercizio) pari a 2 mm/s a distanza di 1 m in modo da rendere ulteriormente conservativo il risultato finale ottenuto.

Per eliminare qualsiasi disturbo vibrazione da parte degli Impianti HVAC / Chillers sarà necessario collocare gli stessi su supporti antivibranti in elastomero/gomma sotto i basamenti dei chillers e delle pompe e applicare giunti antivibranti flessibili su tutte le condotte di mandata/ripresa del fluido refrigerante e sui canali dell'aria. Tale accorgimento eliminerà ogni disturbo vibrazionale interno ed esterno all'edificio.

E' evidente che, tra le apparecchiature presenti, i gruppi elettrogeni destinati alla produzione di energia elettrica in caso di blackout, sono quelli che in misura maggiore posso essere causa di disturbo vibrazionale nell'ambiente circostante.

Dall'esame del datasheet allegato (**Cummins C3750 D5**), la scheda di input per il calcolo quantitativo viene così definita:

TABELLA 11 - SCHEDA TECNICA GENERATORE ELETTRICO CUMMINS C3750 D5

Categoria	Parametro	Valore dal Datasheet	Unità	Note / Utilizzo nel calcolo
Identificazione	Modello Generatore	**Cummins C3750 D5**	-	Motore QSK95G4
Cinematica	Regime di rotazione (N)	**1500**	rpm	$f_0 = 25$ Hz(Frequenza fondamentale dell'albero)
	Frequenza 1°e 2°ordine	**25 / 50**	Hz	Inerzie dell'albero e del manovellismo
Architettura	Configurazione Motore	**Vee, 16 Cilindri**	-	Motore a 4 tempi
	Frequenza di scoppio (f_{fire})	**200**	Hz	$f_{\text{fire}} = (1500/120) \times 16 = 200$ Hz
	Corsa ×Alesaggio	210.1×190.0	mm	Utile per stima inerzie pistone
Massa & Peso	Peso a secco (M_{dry})	**29 500**	kg	Senza fluidi d'esercizio
	Peso operativo (M_{wet})	**31 200**	kg	**Massa usata per l'inerzia del sistema**
Prestazioni	Potenza nominale d'esercizio	**2400 (COP) - 3000 (ESP)**	kWm	Utilizzata per il fattore di carico
Dati d'installazione	Inerzia massa basamento (M_{fond})	*Da definire (es. 60 000)*	kg	Valore raccomandato $\approx 2 \times M_{\text{wet}}$
	Smorzamento/Rigidezza giunti	*Da scheda produttore antivibranti*	N/mm	Target efficienza isolamento $> 92\%$ a 25 Hz
Ambiente	Distanza ricettore (R)	*Da definire in cantiere (es. 10)*	m	Distanza dal centro basamento

Nel calcolo quantitativo analitico (senza modellazione FEM complessa o misure di campo preventive), si applicano i seguenti limiti e assunzioni:

- **Assunzione di Corpo Rigido:** Il gruppo elettrogeno e il blocco di fondazione vengono schematizzati come un sistema rigido massa-molla-smorzatore a 6 gradi di libertà (6-DOF).

- **Effetto del Carico Elettrico (Load):**
  - A **basso carico (1/4 o 1/2)**, prevalgono le forze d'inerzia puramente meccaniche (proporzionali a N^2).
  - A **pieno carico (Full Load)**, la pressione di combustione nei cilindri aumenta notevolmente, incrementando le componenti spettrali alla frequenza di scoppio (200 Hz) e le relative armoniche, oltre alla coppia di reazione sull'alternatore.
- **Attenuazione con la Distanza:** La propagazione delle vibrazioni nel terreno segue la legge di Bornitz:

$$v(R) = v_0 \cdot \sqrt{\frac{R_0}{R}} \cdot e^{-\alpha(R-R_0)}$$

  dove l'attenuazione geometrica (onda di Rayleigh su superficie) si combina con lo smorzamento materiale del suolo (α).
- **Fenomeni di Risonanza:** Il calcolo analitico semplificato *non* considera eventuali frequenze proprie di solai o strutture adiacenti che potrebbero andare in risonanza con i 25 Hz (rotazionale) o con i 200 Hz (scoppio). Se il generatore viene posizionato a solaio anziché su piano di campagna, è necessaria un'analisi dinamica strutturale dedicata.

Per garantire l'operatività del Data Center anche in caso di problemi di rete si prevede l'installazione, relativamente a ciascun data hall, di 16 gruppi elettrogeni di emergenza (32 in totale) di tipo Cummins C3750 D5 per una potenza complessiva pari a circa 228 MWt, unitamente a 25 gruppi di accumulo di energia statici (50 in totale).

L'utilizzo dei gruppi elettrogeni è previsto esclusivamente in caso di emergenza in caso di indisponibilità di alimentazione tramite l'allaccio alla rete elettrica nazionale. In caso di mancanza dalla rete nazionale, tali gruppi elettrogeni saranno in grado di attivarsi automaticamente.

Per quantificare la propagazione delle vibrazioni nel terreno generata dal sistema di alimentazione elettrica in caso di blackout viene eseguita una prima analisi sia su un singolo gruppo elettrogeno Cummins C3750 D5 sia dalla presenza simultanea di 32 generatori identici in esercizio a massimo carico (Full Load), applicando il modello teorico-sperimentale di Bornitz[1] per l'attenuazione delle onde superficiali (onde di Rayleigh). Utilizzando come dati di riferimento quelli della scheda tecnica del gruppo elettrogeno, l'ipotesi di calcolo viene eseguita considerando il motore a massimo carico con frequenza fondamentale di rotazione $f_0 = 25$ Hz corrispondente a 1500 rpm). Il generatore viene considerato installato in prima analisi su un basamento in

[1] Bornitz G, Über die Ausbreitung der von Großkolbenmaschinen erzeugten Bodenschwingungen in die Tiefe. Berlin: Springer, 1931.

calcestruzzo armato avente una massa di $M_{\text{fond}} \approx 62.4$ t, pari al doppio della massa wet del gruppo che risulta essere 31.2 t provvisto di giunti antivibranti ad alta efficienza ($\eta \approx 90\%$).

La velocità di picco di vibrazione di riferimento alla sorgente **(v_0)** (*Peak Particle Velocity* - PPV) per un singolo generatore sul bordo della fondazione ($R_0 = 1$ m) stimata a massimo carico è $v_0 = 2.0$ mm/s.

La norma **UNI 9614:2017** (*"Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo"*) prescrive come parametro primario di riferimento l'**accelerazione ponderata in frequenza** (a_w), valutata mediante la curva di pesatura W_m (conforme alla ISO 2631-2).

Per convertire il campo di velocità in accelerazione a frequenza dominante $f_0 = 25$ Hz (1500 rpm) si applica la relazione armonica del moto:

$$a_w = W_m(f_0) \cdot \omega_0 \cdot v = W_m(25 \text{ Hz}) \cdot (2\pi \cdot 25) \cdot v$$

i cui parametri sono:

1. **Frequenza di riferimento (f_0):** 25 Hz (frequenza fondamentale di rotazione).
2. **Pulsazione (ω_0):** $\omega_0 = 2\pi \cdot 25 = 157.08$ rad/s.
3. **Fattore di ponderazione W_m a 25 Hz:** Secondo le curve ISO 2631-2 / UNI 9614, a 25 Hz il fattore di attenuazione per percezione umana è $W_m(25 \text{ Hz}) \approx 0.316$.

Da cui si otterrà che per una velocità di picco di 2.0 mm/s l'accelerazione equivalente è pari a: $a_{w,PT} = 99.274\, mm/s^2$ alla distanza di un metro per un generatore posto a piano terra.

La configurazione di sistema prevede la presenza di 32 generatori Cummins C3750 D5 (frequenza fondamentale $f_0 = 25$ Hz / 1500 rpm), distribuiti in 2 edifici adiacenti in cemento armato (Edificio A ed Edificio B) ciascuno dei quali ospita 16 generatori su 2 livelli:

- **Piano Terra (PT):** 8 generatori per edificio (16 totali).
- **Primo Piano (P1):** 8 generatori per edificio (16 totali).

Sono inoltre presenti al Piano Terra, sotto ciascun generatore 2 serbatoi di carburante integrati ("belly tank"). La presenza del fluido (gasolio) aggiunge una massa smorzante sul basamento ma riduce l'ancoraggio diretto su suolo nativo rispetto al blocco rigido monolitico interrato.

Per quanto concerne gli effetti dinamici dell'installazione a solai elevati (Piano Primo) avremo che a differenza del Piano Terra, i generatori al primo piano trasmettono vibrazioni a una struttura in elevazione. Per solai industriali in c.a. ben dimensionati (con frequenza propria lontana dai 25 Hz), la trasmissibilità dinamica della struttura amplifica le sollecitazioni di un fattore di

risposta dinamica $A_{\text{struttura}} \approx 1.5 - 2.0$ (valore medio 1.75) per cui avremo che, relativamente ai generatori a piano primo, $a_{w,1P} = 99.274 \cdot A_{struttura} = 99.274 \cdot 1.75 = 173.73\, mm/s^2$

Il passaggio delle vibrazioni dal basamento/fondazione dell'edificio al terreno circostante scontra un'interfaccia di impedenza, che attenua l'onda trasmessa all'esterno per un fattore $T_{\text{fond}} \approx 0.70$.

I 32 generatori a pieno regime operano in incoerenza di fase producendo una sovrapposizione energetica che dovrà tenere conto anche dell'attenuazione del giunto di base di Edificio T_{fond} da cui

$$a_{w,\text{tot}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{32} a_{w,i}^2} \cdot T_{fond}$$

Poichè i 32 generatori producono differenti accelerazioni avremo che per i 16 generatori a piano terra $a_{w,PT} = 99.274\, mm/s^2$ e per i 16 generatori a piano primo $a_{w,1P} = 173.73\, mm/s^2$. Da cui la $a_{w,\text{tot}} = \sqrt{16 \cdot 99.274^2 + 16 \cdot 173.73^2} \cdot T_{fond} = 560.26\, mm/s^2$.

L'attenuazione del moto vibratorio nel terreno in funzione della distanza dalla sorgente può essere determinata dalla relazione di Bornitz, che stima la propagazione delle vibrazioni.

La relazione di Bornitz esprime il valore della vibrazione dalla sorgente secondo la seguente formula:

$$a_w(R) = a_{w,\text{sorgente}} \cdot \sqrt{\frac{R_0}{R}} \cdot e^{-\alpha(R-R_0)}$$

Dove:

- $\alpha\ espresso\ in\ m^{-1}$ (coefficiente di attenuazione del terreno limoso-sabbioso a 25 Hz).
- R_0 = 1 metro
- R = variabile

Il valore di α dipende dalle caratteristiche del terreno ed è legata alla natura del terreno e alla frequenza della vibrazione. Facendo riferimento alle tabelle dei valori di attenuazione proposte dalla classificazione Woods e Jedele (R. Woods L.P. Jedele, Energy-Attenuation Relationships from construction Vibration, Engineering, 1985) il terreno nello specifico può essere considerato di Classe II con valori che oscillano tra 0,01 m^{-1} a 5 Hz e 0,10 m^{-1} a 50 Hz. Tenuto conto che i Cummins C3750 D5 lavorano ad una frequenza fondamentale f_0 = 25 Hz / 1500 rpm il valore di α può essere approssimato a 0.05 m^{-1}.

Valutando il caso specifico dei tre recettori (R1, R2 e R5) da analizzare si otterrà che:

Ricettore (R5) a 200 metri

- **Valore Calcolato:** $a_w(200) = \mathbf{0.00189}$ mm/s^2
- **Confronto Limiti UNI 9614:2017:**
  - Limite Notturno (3.60 mm/s^2): $\mathbf{0.00189} < 3.60 \rightarrow$ **VERIFICATO**
  - Limite Diurno (7.20 mm/s^2): $\mathbf{0.00189} < 7.20 \rightarrow$ **VERIFICATO**
- **Esito:** Il livello di vibrazione calcolato per i 32 generatori distribuiti nei due edifici rientra ampiamente nei requisiti normativi di legge.

Ricettore (R1) a 350 metri

- **Valore Calcolato:** $a_w(350) = 0.00001$ mm/s^2
- **Confronto Limiti UNI 9614:2017:**
  - Limite Notturno (3.60 mm/s^2): $0.00001 \ll 3.60 \rightarrow$ **VERIFICATO**
- **Esito:** Vibrazione impercettibile sia a livello umano sia strumentale.

Ricettore (R2) a 400 metri

- **Valore Calcolato:** $a_w(400) = \mathbf{inesistente}$
- **Confronto Limiti UNI 9614:2017:**
  - Limite Notturno (3.60 mm/s^2): **VERIFICATO**
- **Esito:** Campo di oscillazione completamente estinto.

Dall'analisi e la comparazione dei dati si può osservare che la collocazione del 50% delle macchine (16 generatori) al primo piano eleva la percezione vibratoria rispetto alla posa a terra, a causa della risposta flessionale dei solai elevati. Con tale configurazione la distanza minima per garantire la conformità notturna ($a_w \leq 3.60$ mm/s^2) è pari a circa 60 metri. Di conseguenza, tutti i recettori posti a 200m, 350m e 400m risultano ampiamente protetti e conformi ai requisiti di legge. Si evidenzia inoltre che i tre recettori indicati sono immobili non destinati ad abitazione da cui ne risulta che il risultato, valutato secondo i limiti alquanto riduttivi delle abitazioni, sono ulteriormente cautelativi per la specifica destinazione d'uso del fabbricato.

Per le macchine collocate al primo piano sarà fondamentale prevedere una combinazione di ammortizzatori a molla elicoidale a bassa frequenza propria ($f_n \leq 3 - 4$ Hz) e basamenti di inerzia (*inertia bases*) legati alla struttura, per evitare che fenomeni di risonanza con i solai incrementino ulteriormente la trasmissione al terreno esterno.

7. PIANO DI MONITORAGGIO VIBRAZIONALE

Ai fini di una corretta valutazione della compatibilità vibrazione dell'opera in progetto nelle differenti fasi di cantiere e di esercizio è stato previsto un piano di monitoraggio rivolto alle abitazioni, alle attività e alle strutture circostanti, articolando l'analisi secondo le normative vigenti.

La normativa di riferimento è la UNI 9614:2017 che definisce la "*Misura e valutazione delle vibrazioni negli edifici con riferimento al disturbo alle persone*". Essa costituisce la norma guida per la stima dell'impatto sugli occupanti dei recettori civili, terziari e industriali e la ISO 2631-1 / ISO 2631-2 concernente la "*Valutazione dell'esposizione umana alle vibrazioni a corpo intero negli edifici (1 Hz – 80 Hz)"*.

Al fine di procedere ad un corretto piano di monitoraggio è stata effettuata una mappatura dell'area di impatto definendo un Dominio di Studio che presenta un raggio di influenza di 350/400 metri dal perimetro dell'area di cantiere/edificio all'interno del quale eseguire una preventiva **Campagna di Monitoraggio Ante-Operam** che avrà lo scopo di definire lo stato di qualità dal punto di vista vibrazionale del territorio prima dell'inizio dei lavori, consentendo la valutazione dei valori di riferimento (baseline) indispensabili per misurare in futuro gli impatti causati dal cantiere e dall'opera finita.

7.1 PIANO DI MONITORAGGIO VIBRAZIONALE (PMV) ANTE-OPERAM

La Campagna di monitoraggio ante-operam dovrà seguire le seguenti specifiche:

- Strumentazione: Terna accelerometrica/geofonica triassiale ad alta sensibilità (< 10 m^{-4} m/s^2);
- Punti di misura: I punti di misura saranno collocati in corrispondenza delle fondazioni, o in prossimità di esse, e ai piani superiori (se presenti) dei recettori più esposti (R1, R2 e R5);
- Durata del monitoraggio**:** Monitoraggio continuo per 24 – 48 ore per caratterizzare il fondo vibrazionale (traffico veicolare, attività industriali preesistenti) distinto tra periodo diurno (6:00 – 22:00) e notturno (22:00 – 6:00).

Avendo definito il rumore di fondo dell'area in esame nelle successive fasi di corso d'opera sarà eseguita una valutazione previsionale di cantiere per definire la Campagna di monitoraggio in corso d'opera.

7.2 PIANO DI MONITORAGGIO VIBRAZIONALE (PMV) IN CORSO D'OPERA

Caratterizzazione delle Sorgenti di Cantiere

- Scavo e Movimento Terra: Escavatori da $20-40$ t, ripper, rulli compattatori vibranti (sorgente critica a bassa frequenza, $25-45$ Hz
- Palificazione CFA (Continuous Flight Auger - Elica Continua): Caratterizzata da vibrazioni stazionarie/rotazionali indotte dall'infissione dell'elica e dal pompaggio di calcestruzzo Emissione sismica inferiore rispetto ai pali battuti tradizionali, ma con componenti persistenti tra 10 Hz e 30 Hz.

Valutazione del Disturbo (UNI 9614:2017)

1. **Ponderazione in frequenza**: Applicazione del filtro W_k per l'asse verticale z e W_d per gli assi orizzontali x, y.

Calcolo dell'Accelerazione Efficace Ponderata ($a_{w,eff}$):

$$a_{w,eff} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T a_w^2\,(t)\,dt}$$

Confronto con i Limiti: Valutazione dei livelli $a_{w,eff}$ nei periodi di lavoro rispetto alle curve di percepibilità e ai fattori moltiplicativi previsti dalla UNI 9614 per le tipologie d'uso dei fabbricati.

Architettura della Rete di Monitoraggio:

- Posizionamento: Centraline fisso/remotizzate posizionate sulle fondazioni e sul solaio del piano più sfavorevole dei recettori.
- Modalità di Acquisizione: Registrazione continua del segnale temporale e calcolo in tempo reale degli indici PPV (mm/s) e $a_{w,eff}$ (m/s^2) con trasmissione dati su piattaforma cloud.
- Protocollo di Gestione a Tre Soglie (Sistema Semaforico)

Livello	Soglia (aw,eff / PPV)	Azione Operativa
Soglia Verde	$<$ 70% del limite UNI 9614	Operatività di cantiere standard. Nessuna restrizione.
Soglia Gialla (Pre-allarme)	$70\% - 100\%$ del limite	Avviso al Direttore dei Lavori. Rimodulazione della velocità di rotazione delle sonde CFA o della frequenza dei rulli.

Livello	Soglia (aw,eff / PPV)	Azione Operativa
Soglia Rossa (Allarme)	$> 100\%$ del limite	Arresto immediato delle lavorazioni impattanti. Adozione di mitigazioni operative (es. pre-scavo, trincee smorzanti).

7.3 PIANO DI MONITORAGGIO VIBRAZIONALE (PMV) IN FASE DI ESERCIZIO

In fase di esercizio, poiché il Data Center generà vibrazioni di natura prevalentemente stazionaria dovute alle apparecchiature elettromeccaniche dovrà essere eseguito un monitoraggio ad opera finita.

Fase di Esercizio: Modellazione e Scenari Data Center

In fase di esercizio, il Data Center genererà vibrazioni a causa della presenza del sistema di generatore elettrico di emergenza.

Sorgenti Vibrazionali Tipiche

- Emergency Power: Costituito da 32 Generatori Diesel di Emergenza (G.E.) di grande taglia (3 MVA ciascuno).

Scenario: Test Simultaneo dei Generatori di Emergenza (previsto fino a 4 generatori in contemporanea) (fase di manutenzione)

- Condizioni operative: Funzionamento programmato a regime dei G.E. installati in parallelo per una durata limitata ($30\ minuti$, periodo diurno).
- Frequenze critiche:
  - Frequenza fondamentale di rotazione: $f_{rot} = 25$ Hz (per motori a 1500 rpm).
  - Frequenza di scoppio dei cilindri (es. $V16$ a 4 tempi): $f_{scoppio} = 25 \times (16/2) = 200$ Hz.
- Analisi dinamica: Valutazione della trasmissione di energia dinamica dai basamenti dei G.E. al terreno attraverso il solai/piastra di fondazione, con potenziale sovrapposizione delle fasi e fenomeno di battimento tra i diversi motori.

Valutazione di Compatibilità ai sensi della UNI 9614:2017

Calcolo degli spettri di accelerazione: Modellazione della risposta dinamica dell'edificio recettore per banda di terzo d'ottava (1 Hz $-$ 80 Hz).

Procedura di Calcolo

Forza Residua Trasmessa alla Fondazione (F_{tr}): $F_{tr}(f) = F_0(f) \cdot T_r(f)$

Propagazione e Risposta dell'Edificio Recettore: Calcolo dello spettro dell'accelerazione $a(f)$ nei tre assi (x, y, z) presso i solai dei recettori R_n, includendo le funzioni di trasferimento del terreno e le risposte modali dei solai del recettore.

Ponderazione in Frequenza (UNI 9614): Si applicano i filtri di ponderazione stabiliti dalla norma nell'intervallo 1 Hz $-$ 80 Hz:

- Filtro W_k per l'asse verticale z (massima sensibilità nell'intervallo 4 Hz $-$ 8 Hz).
- Filtro W_d per gli assi orizzontali x, y (massima sensibilità nell'intervallo 1 Hz $-$ 2 Hz).

Calcolo dell'Accelerazione Efficace Ponderata **($a_{w,eff}$)**:

$$a_{w,eff} = \sqrt{\sum_i (a_i \cdot w_i)^2}$$

(dove a_i è l'accelerazione RMS nella banda di $1/3$ d'ottava i-esima e w_i è il fattore di ponderazione corrispondente).

Criterio di Accettabilità: L'accelerazione ponderata risultante $a_{w,eff}$ non deve superare il valore limite a_{lim} associato alla tipologia del recettore:

$$a_{w,eff} \leq a_0 \cdot K$$

- $a_0 = 0.005$ m/s^2 (soglia di percezione di riferimento).
- K: fattore moltiplicativo definito dalla UNI 9614 (es. $K = 2 - 4$ per residenziale diurno/notturno, $K = 8 - 12$ per uffici/commerciale).

Se il valore calcolato allo Scenario soddisfa $a_{w,eff} \leq a_{lim}$, l'isolamento del basamento inerziale è validato.

8. MISURE MITIGATORIE

Per misura mitigatoria in ambito vibrazionale si intende qualsiasi intervento tecnico, strutturale o procedurale mirato a ridurre l'ampiezza, la frequenza o la trasmissione delle sollecitazioni dinamiche generate da una sorgente prima che queste raggiungano i recettori sensibili.

L'obiettivo fondamentale della mitigazione vibrazionale è interrompere o attenuare la catena di trasmissione "Sorgente ➔ Mezzo di propagazione ➔ Ricettore", conducendo i livelli di vibrazione entro i limiti stabiliti dalle normative di settore (es. UNI 9916, UNI 9614 e norma ISO 2631) qualora i dati del monitoraggio in fase di corso d'opera o di esercizio le rendano necessarie.

In fase di cantiere le misure mitigatorie si potranno concentrare su:

- Utilizzo di escavatori con benne dentate ad alte prestazioni per evitare l'uso di martelli demolitori;
- Adozione rigida della tecnologia CFA con controllo della velocità di avanzamento;
- Esecuzione di trincee di disaccoppiamento antivibrante (profondità ≥ 3 m) lungo il perimetro

di cantiere adiacente ai recettori più sensibili.

In fase di esercizio le misure mitigatorie da considerare, qualora i dati del monitoraggio vibrazionale in fase di esercizio le rendano necessarie, potranno invece essere:

- Disaccoppiamento dei Generatori di Emergenza mediante l'installazione dei G.E. su basamenti inerziali in calcestruzzo armato disaccoppiati dalla piastra di fondazione principale dell'edificio mediante giunti viscoelastici.

Qualora si renda necessario dovrà essere predisposto un apposito progetto dell'Isolamento Dinamico che dovrà tenere conto del corretto dimensionamento del basamento inerziale che possa garantire una migliore rigidità flessionale oltre all'adozione di isolatori antivibranti a molle elicoidali con smorzatori elastometrici con efficienza di isolamento > 95% alla frequenza fondamentale di 25Hz affinché il risultato finale del monitoraggio sia conforme a quanto prescritto dalla Norma UNI 9614:2017. Qualora necessario potrà essere prevista la realizzazione di una trincea di disaccoppiamento antivibrante (profondità ≥ 3 m) lungo il perimetro degli edifici che contengono i generatori avente lo scopo di interrompere la propagazione delle vibrazioni nel terreno.

9. CONCLUSIONI

Alla luce delle analisi svolte nel presente studio previsionale, il livello di vibrazione stimato sia in fase di esercizio che nella fase di cantiere sui potenziali edifici recettori analizzati è risultato inferiore ai valori limite di valutazione del disturbo (UNI 9614:2017); di conseguenza sono da escludersi anche potenziali effetti di danno architettonico agli stessi edifici (UNI 9916:2014).

Da una analisi condotta sia in fase di esercizio sia in fase di corso d'opera, per quanto attiene alle vibrazioni di natura meccanica o cinetica l'apporto in termini di effetti o sensazioni di vibrazione nei confronti di specifici recettori e/o strutture e fabbricati di qualsiasi tipologia, si attesta su livelli inferiori la soglia di percezione umana poiché il loro contributo può essere considerato trascurabile e/o nullo.

La componente "vibrazioni" è stata valutata in termini quantitativi con la metodologia di stima descritta attraverso la verifica del "criterio del danno strutturale" e del "criterio del disturbo". Il dato previsionale ottenuto in base alle assunzioni sopracitate evidenzia che ad una distanza di circa 180 m delle sorgenti, nella peggiore situazione, in fase di esercizio ed in condizione notturna, le vibrazioni trasmesse sono già al di sotto dei valori da rispettare per le abitazioni (Uni 9614:2017).

Ai fini di una corretta valutazione della compatibilità vibrazione dell'opera in progetto nelle differenti fasi di cantiere e di esercizio è stato previsto un piano di monitoraggio rivolto agli edifici, alle attività e alle strutture circostanti, articolando l'analisi secondo le normative vigenti considerando inoltre che i recettori indicati sono immobili non destinati ad abitazione per i quali la corretta valutazione del monitoraggio dovrà tenerne conto. Qualora il risultato del monitoraggio rispetta i limiti alquanto riduttivi delle abitazioni, l'esito finale sarà quindi a vantaggio di una maggiore sicurezza in termini vibrazionali in relazione alle specifiche destinazioni d'uso del fabbricato.

Il piano di monitoraggio dovrà essere attuato in fase ante-operam, in fase di corso d'opera ed in fase di esercizio. Qualora i dati ottenuti non risulteranno conformi a quelli previsti dalle norme tecniche sarà necessario applicare le misure mitigatorie riportate per ricondurre i valori determinati entro i limiti.